

Propagation des ondes de sécheresse et d'humidité à travers le monde

Nathalie KAYSER, Jean-Luc PROBST, Daniel CADET et Yves TARDY

Résumé — Probst et Tardy ([5], [6]) ont montré une propagation SW-NE des ondes de sécheresse, à l'échelle du siècle, dans les fluctuations du débit de 49 fleuves. Une analyse spectrale systématique et une technique de filtrage des débits confirment ce résultat. Une analyse par spectres croisés fournit les déphasages entre les séries et le sens de propagation de l'onde. Les fluctuations enregistrent trois périodicités.

Global world propagation of dryness and wetness waves

Abstract — Probst and Tardy ([5], [6]) have shown the propagation of the drought waves, from the runoff fluctuations of 49 large rivers. A spectral analysis and technique of data filtering confirm the results. A cross spectra analysis yields the differences of phase between the series as well as the direction of the wave propagation. Among the fluctuations three periodicities have been detected.

Abridged English Version — Climatic fluctuations are understood as quasi cyclic phenomena. Fluctuations of the climatic parameters Global Temperature (GT, [3]), Global continental Runoff (GR, [5]), Southern Oscillation Index (SOI, [4]), are correlated with the Sunspot activity (SUNS, [1], [2]). Also the discharges of the major world rivers are fluctuating together with the above parameters [6]. They reflect interannual variations of regional climates.

In a recent article, Probst and Tardy [6] have qualitatively shown that for each continent and from one continent to another, the waves of dryness and wetness propagate from West to East and from South to North. They appear to propagate similarly to high and low pressure anomalies, as shown for the whole world by Krishnamurti *et al.* [7] to describe the Southern Oscillation (SOI) in the Pacific Ocean. Thus, the year 1949, for example, was very dry in Western Europe at that time occupied, more often than in a normal situation, by a high pressure anomaly. The following years, high pressure anomaly and dryness propagate together eastwards, so that 1950 was a very dry year in Eastern Europe, 1952 in the Ural and 1955 in Siberia [6]. The same observations are made for humid years propagating also eastwards and northwards in all the continents.

Data used are annual river discharges ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) collected, for the last century, by Probst and Tardy, ([5], [6]) in UNESCO reports and in hydrological national services for 49 large rivers distributed all around the world. Also parameters representing global climate fluctuations are considered: SOI (southern oscillation index of pressure anomalies in the Pacific Ocean, [4]), GT (global surface air difference temperature, [3]), GR (global runoff, [5], [6]) as well as SUNS (sunspot activity [1], [2]). Data were treated first by filtration (3 years moving average), then submitted to spectral analysis using the Hayashi [8] method based on the maximum entropy, also to filtering by the Butterworth method [12]. The moving average avoids the seasonal variations. The method of the maximum of entropy exhibits the frequencies of the time series by moving a filter on all the frequencies and by measuring the associated energy. The Butterworth filtering is a test about the reproducibility of these frequencies in the time. Three quasi periodicities are distinguished, independently of the geographical position: 2-4 years for 21 rivers, 4-6 years for 30 rivers, 10-20 years for

Note présentée par Georges MILLOT.

0764-4450/90/03100757 \$ 2.00 © Académie des Sciences

21 rivers. Parameters such as SOI (3.6 years and 6.1 years), GR (3.1 years, 5.1 years and 12.5 years), GT (3.0 years and 4.8 years), and SUNS (3.3 years, 5.4 years and 10.5 years) also exhibit same quasi periodicities. Other periodicities appear rarely: 6-8 years, 8-10 years, 20-30 years and 30-40 years. In Africa (except for the Nile), in South America and in Asia, the river discharges exhibit 10-20 year periodicities with a very high peak of energy. Instead, in Europe, 2-4 and 4-6 year periodicities appear equal or greater than the 10-20 year periodicities. In North America, the occurrences of these ranges of periodicities are in an intermediate case.

Lines of isophase were constructed by maximum entropy cross-spectra analysis taking the Rhône (in France) as a river reference, and 20 different rivers all around the world for which a phase lag coherence is greater than 0.46 for the 10-20 year periodicity (rivers for which the phase lag is physically significant). A phase lag of 100° shows approximatively a lag of three years. Synchronous fluctuations, phase lags and phase oppositions are shown on Figure 1. For the 10-20 year quasi periodicity, the western coast of Canada, Brazil, South Africa, Thailand and Kamchatka appear in phase. River discharge fluctuations for other regions appear all shifted by comparison with the Rhône chosen here as reference. Phase lags can be understood as a result of dryness and wetness wave propagation through the whole world.

INTRODUCTION. — Les fluctuations climatiques sont aujourd'hui comprises comme des phénomènes quasi cycliques. Les fluctuations de l'activité solaire ([1], [2]), de la température moyenne globale [3], de l'indice d'oscillation australe des pressions [4], de l'écoulement continental global [5] apparaissent comme imparfaitement cycliques. Les fluctuations du débit des grands fleuves qui traduisent, à l'échelle régionale, les variations d'humidité du climat suivent également cette règle [6]. Dans un article récent, Probst et Tardy [6] ont montré de façon qualitative qu'à la surface de chacun des continents, et d'un continent à l'autre, les périodes de sécheresse et d'humidité se propageaient d'Ouest en Est et du Sud vers le Nord, suivant ainsi la propagation des hautes et des basses pressions, mise en évidence par Krishnamurti et coll. [7], sur l'ensemble du globe à partir des oscillations sur l'Océan Pacifique de l'indice des variations des pressions australes (SOI : Southern Oscillation Index). Ainsi, l'année 1949 est très sèche en Europe de l'Ouest, alors soumise plus souvent qu'en temps normal à un régime de hautes pressions. En même temps que la propagation des hautes pressions, la sécheresse se propage vers l'Est : on la retrouve en 1950 en Europe de l'Est, en 1952 sur l'Oural, en 1955 en Sibérie orientale [6].

Dans ce travail, on se propose, grâce à une analyse spectrale systématique sur des données filtrées par une méthode appropriée, de distinguer quantitativement les quasi-périodicités qui se combinent pour donner les signaux des fluctuations interannuelles de débits, de mesurer les déphasages qui séparent chacune de ces fluctuations, et de déterminer ainsi le sens et l'importance des propagations. La même analyse a été conduite sur les variations de quatre paramètres considérés comme caractéristiques des fluctuations du climat global : fluctuations de l'activité solaire (SUNS), de l'indice d'oscillation des pressions australes (SOI), de la température globale de l'air (GT) et de l'écoulement continental global (GR). Le but est ici de montrer comment sont reliées les fluctuations du débit des fleuves et celles de ces différents paramètres.

I. DONNÉES. — Les données utilisées sont les débits annuels ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), recueillis par Probst et Tardy ([5], [6]) dans les rapports de l'UNESCO et des différents services hydrologiques nationaux, de 49 fleuves répartis à travers le monde. Les enregistrements s'étalent sur une période d'environ un siècle. A côté des débits, on a considéré les valeurs des paramètres SUNS, SOI, GT, GR, réputés refléter les fluctuations du climat global : SUNS (SUNSpot activity), les variations de l'intensité des taches solaires, SOI (Southern Oscillation Index), l'indice des oscillations des pressions australes, calculé par la différence de pression existant entre Tahiti et Darwin en Australie, GT (Global Temperature), les variations globales de température de surface de l'air (écart de température par rapport à la moyenne), GR (Global Runoff), les variations de l'écoulement fluvial continental global.

II. MÉTHODES D'ÉTUDE. — Les données ont été traitées par analyse spectrale (maximum d'entropie), et filtrées par la méthode Butterworth. Chaque série de données est tout d'abord lissée par la méthode des moyennes mobiles calculée sur trois années consécutives. L'analyse spectrale de chaque enregistrement est ensuite effectuée par la méthode du maximum d'entropie d'Hayashi [8]. Cette méthode met en valeur les fréquences qui se combinent pour constituer le spectre des débits annuels de chacun des fleuves considérés. L'enregistrement des débits est une suite temporelle de signaux à valeur de réels, assimilée à une série d'énergies mesurées, et considérée comme stationnaire, c'est-à-dire ne tendant pas à croître ou à décroître avec le temps. L'analyse spectrale consiste à rechercher la répartition de l'énergie de ces signaux en fonction de leur fréquence [9] pour mettre en évidence les composantes périodiques. La méthode du maximum d'entropie d'Hayashi [8] donne une résolution très fine pour des enregistrements de courte durée. L'analyse aboutit au calcul de fonctions d'autocorrélation, par extrapolation de corrélations de retard connu d'un point donné dans le temps par rapport à un autre retard supposé infini. En pratique, il s'agit du déplacement d'un filtre sur le domaine des fréquences étudiées ([10], [11]). Le spectre résultant correspond à une entropie, c'est-à-dire l'information la plus aléatoire possible de la puissance spectrale en fonction de la période. L'analyse par spectres croisés compare deux séries et estime en chaque point le déphasage d'une série par rapport à l'autre.

Filtrage des données par la méthode Butterworth. — Le filtrage décompose le signal en une somme de plusieurs fonctions sinusoïdales et élimine celles dont la fréquence n'est pas significative. La méthode Butterworth [12] permet de vérifier si une fréquence déterminée par l'analyse spectrale donne un même signal reproductible dans le temps par la méthode du fenêtrage. L'intérêt d'une telle méthode est la récursivité : elle n'introduit pas de données aléatoires.

III. RÉSULTATS. — *L'analyse spectrale* par la méthode du maximum d'entropie fait apparaître, quelle que soit la situation géographique du fleuve, trois quasi-périodicités clairement identifiées sur les courbes de la figure 2 par des pics nets : entre 2 et 4 ans pour 21 fleuves, entre 4 et 6 ans pour 30 fleuves, entre 10 et 20 ans pour 21 fleuves. Les autres fleuves, pour la plupart, montrent un épaulement localisé aux mêmes valeurs. Dans quelques cas rares, on observe une quasi-périodicité pour des valeurs différentes : 6-8 ans (7 fleuves), 8-10 ans (4 fleuves), 20-30 ans (6 fleuves), 30-40 ans (6 fleuves). Les paramètres du climat global, de leur côté, montrent des périodicités semblables : SOI (3,6 et 6,1 ans), GT (3,0 et 4,9 ans), GR (3,1, 5,1 et 12,5 ans). Ainsi, à l'échelle du siècle, les périodicités des fluctuations du climat global et des fluctuations des climats régionaux

TABLEAU

Caractéristiques des paramètres fluviaux et hydroclimatiques donnés,
et périodicités (en années) déterminées par analyse spectrale en trois classes.

*Characteristics of river and hydroclimatic parameters, and periodicities (in years) determined
by spectral analysis, in three ranges.*

Nom du fleuve	Station de jaugeage	Centre de gravité du bassin:		Classes de périodicités		
		long	lat	2-4	4-6	10-20
GARONNE	MAS D'AGENNAIS	44.02	001.06		4.4	
LOIRE	MONTJEAN	47.46	002.22		4.5	
SEINE	PARIS	48.52	002.20		4.0	11.1
RHONE	LYON	45.46	004.40		4.2	12.5
EBRE	TORTOSA	42.04	-001.37			
GUADALQUIVIR	ALCALA DEL RIO	38.02	-004.23			
PO	PONTELAGOSCURO	43.05	009.41	2.9		
VANERN	VANESBORG	58.23	012.19	3.3		13.3
VUOKSA	IMATRA	60.58	029.07			
ELBE	DECIN	51.34	013.01		4.5	15.3
VISTULE	TCZEV	52.15	021.00	3.7		13.3
ODER	GOZDOVICE	51.40	016.06		4.0	12.5
DANUBE	ORSOVA	44.40	022.30		4.1	18.1
DVINA	UST PINEGA	55.31	028.11		5.7	
DON	RAZDORSKAIA	49.39	041.45		5.0	14.2
VOLGA	VOLGOGRAD	54.19	048.22		4.5	15.3
NEMAN	SMALININKAI	54.00	023.58			11.7
OURAL	KUSHUM	51.38	054.11		5.7	
KOLYMA	SREDNEKOYMSK	65.42	150.49	3.4		14.8
AMOUR	KOMSOMOLSK	49.15	129.39	2.8	4.8	16.6
OB	SALEKHARD	61.13	073.20		4.8	15.3
YENISSEI	IGARKA	55.06	032.43		5.4	
LENA	KUSUR	62.10	129.50	3.2		
MEKONG	MUKDAHAN	19.53	102.10			
GODAVARI	DOWLAISHAVARAN	18.44	080.04		4.0	15.3
NIL	ASVAN	15.37	032.29	2.8		
SENEGAL	BAKEL	14.54	-012.26	3.0	5.1	
NIGER	KOULIKORO	16.19	-000.09	3.1		
CHARI	N'DJAMENA	10.32	016.45	3.8		
CONGO	KINSHASA	02.08	021.37	2.9	5.7	
ZAMBEZE	MATUNDO CAIS	-17.55	026.29	3.2	5.2	
LIMPOPO	CHOKULE	-22.10	029.59	2.8		11.7
ORANGE	DIMO III	-29.04	023.38			10.5
ST LAURENT	OGDENSBURG	44.42	-075.31	3.0	5.2	
RED RIVER	EMERSON	47.57	-097.05	3.0	5.2	
ASSINIBOINE	HEADINGLY	49.56	-100.49	3.3	6.0	
N.SASKATCHEVAN	PRINCE ALBERT	53.36	-109.36		4.6	14.2
S.SASKATCHEVAN	SASKATOON	50.50	-107.02	2.9	4.6	16.6
SUSQUEHANNA	HARRISBURG	41.03	-076.12	2.8	4.5	12.5
NIAGARA	QUEENSTON	43.05	-079.06	3.1	5.8	15.3
COLORADO	LEES FERRY	31.06	-098.32	2.8	4.7	
MISSISSIPPI	ALTON III	39.41	-091.20			
MISSOURI	HERMAN	39.02	-095.41		5.5	16.6
OHIO	METROPOLIS III	32.42	-083.38			
COLUMBIA	THE DALLES	46.40	-119.28		4.8	
SNAKE	CLARKSTON	47.37	-116.55		5.7	
PARANA	CUAIRA	-26.28	-054.43	3.1		
SAO FRANCISCO	JUAZEIRO	-13.16	-043.23	3.0	4.8	
AMAZONE	OBIDOS	-04.03	-062.52		5.8	
Paramètres hydroclimatiques globaux				2-4	4-6	10-20
GR				3.0	5.1	12.5
SOT				3.6	6.0	
SUNS				3.3	5.4	10.5
GT				3.0	4.8	

sont les mêmes que celles des fluctuations de l'activité des taches solaires (paramètre SUNS : 3,3, 5,4 et 10,5 ans) (tableau).

Les fleuves d'Asie, d'Afrique (Nil excepté) et d'Amérique du Sud présentent des périodicités inférieures à 10 ans moins bien marquées que pour 10-20 ans. Les fleuves d'Europe, jusqu'à l'Oural, montrent en revanche deux périodicités inférieures à 10 ans, très nettement marquées. Les fleuves de l'Amérique du Nord sont en position intermédiaire.

L'analyse des spectres croisés permet le tracé des courbes d'égal déphasage par rapport à un fleuve choisi comme référence (ici, le Rhône) pour une vingtaine de fleuves répartis à travers le monde, chacun étant représenté par le centre de gravité de son bassin versant. Les fleuves choisis sont ceux qui présentent une cohérence de déphasage supérieure à 0,46 sur la périodicité 10-15 ans. Sur la figure 1, on suit ainsi la propagation des périodes de sécheresse ou d'humidité sur l'ensemble de la planète, un déphasage de 100° représentant un retard de l'onde d'un peu plus de 3 ans. Les lignes isophase s'ordonnent de façon cohérente dans un sens de progression méridienne analogue à celle qui a été détectée par Krishnamurti et coll. [7] pour la propagation des anticyclones et des dépressions.

Les opérations de filtrage des données ont été menées en combinant deux courbes sinusoïdales. La première courbe de coupure 12,5 ans est valable pour un grand nombre de fleuves, pour le débit global (GR) et pour l'activité des taches solaires (SUNS). Elle met en évidence des fluctuations décennales. En lui superposant une autre courbe sinusoïdale, significative des variations à plus court terme, on met par exemple en évidence que, pour la périodicité 2-4 ans, les fleuves d'Afrique de l'Ouest et d'Amérique du Sud fluctuent en opposition de phase. Pour les fleuves des côtes est et ouest de l'Amérique du Nord, le décalage des fluctuations est important pour la périodicité 12,5 ans, mais apparaît en phase pour la période de 5 ans. Entre l'Amérique du Nord et l'Europe, les fluctuations des débits des fleuves Rhône et Missouri (*fig. 3*) montrent que les deux continents varient globalement en opposition de phase pour l'ensemble des périodicités inférieures à 12,5 ans.

CONCLUSIONS. — On montre qu'au cours du siècle écoulé, les fluctuations des débits des grands fleuves sont polycycliques et quasi périodiques, et que les périodes de sécheresse et d'humidité se propagent comme des ondes à travers le monde.

1. Les fluctuations des débits de 49 grands fleuves du monde apparaissent chacune comme une somme de plusieurs contributions quasi périodiques.

2. Les fluctuations des paramètres caractéristiques du climat global : l'indice des oscillations australes des pressions (SOI), les variations de température globale (GT), l'écoulement continental global (GR) et les fluctuations de l'activité solaire (SUNS) exhibent les mêmes propriétés.

3. Toutes les périodicités n'apparaissent ni pour tous les fleuves ni pour tous les paramètres. Les plus fréquentes et les plus importantes (2-4, 4-6 et 10-20 ans) correspondent cependant aux trois premières périodicités trouvées pour les fluctuations de l'activité solaire (3,3, 5,4 et 10,5 ans). Les fluctuations des débits de certains fleuves exhibent également des périodicités de 6-8 ans, 8-10 ans, 20-30 ans et 30-40 ans. Celles-ci sont plus rares que les trois premières.

4. En tous les points du globe, les fluctuations des débits des fleuves, à périodicités égales, ne sont synchrones ni entre elles ni avec le paramètre SUNS qui mesure l'intensité de l'activité solaire. Ainsi, une année d'intense activité solaire peut être accompagnée par une sécheresse et une diminution des débits pour certaines parties du globe, et par une phase d'humidité et une augmentation des débits pour d'autres parties du globe.

5. Pour la périodicité 10-20 ans notamment, les fluctuations des débits sont synchrones sur des courbes isophase qui relient par exemple la côte ouest du Canada, le Brésil, l'Afrique du Sud, la Thaïlande et le Kamchatka, ou bien la côte est des États-Unis, le Mali, l'Inde et le centre de la Sibérie. En se déplaçant d'Ouest en Est ou du Sud au Nord, on recoupe donc ces courbes isophase. Le long d'un même méridien ou d'un

même parallèle, les fluctuations sont déphasées et les périodes sèches et humides sont décalées les unes par rapport aux autres. Lorsque le déphasage est important, on peut même observer des fluctuations en opposition de phase : les sécheresses ici correspondent alors aux périodes humides là.

6. Les décalages peuvent être compris comme le résultat de la propagation d'ondes de sécheresse et d'humidité qui suivent le déplacement des anticyclones et des dépressions. Les déphasages apparaissent finalement comme la conséquence du « ballet » des cellules convectives d'air atmosphérique à la surface du globe tel que l'ont montré Krishnamurti et coll. [7].

Note remise le 29 janvier 1990, acceptée le 2 février 1990.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] M. WALDMEIER, *The Sunspot activity in the Years 1610-1960*, Schultess and Co., Zurich, 1961, 171 p.
- [2] N. O. A. A., *Solar Geophysical Data*, Boulder, Colorado U.S.A.
- [3] P. D. JONES, T. M. L. WIGLEY et P. B. WRIGHT, *Nature*, 322, 1986, p. 430-434.
- [4] P. B. WRIGHT, *An Index of the Southern Oscillation*, Climatic Research Unit, Report 4, University of East Anglia, Norwich, 1975.
- [5] J.-L. PROBST et Y. TARDY, *Journ. Hydrology*, 94, 1987, p. 289-311.
- [6] J.-L. PROBST et Y. TARDY, *Amer. Journ. Sci.*, 289, 1989, p. 267-285.
- [7] T. N. KRISHNAMURTI, S. H. CHU et W. IGLESIAS, *Arch. Meteor. Geophys. Bioclim.*, ser. A, 34, 1986, p. 385-425.
- [8] Y. HAYASHI, *Journ. Met. Soc. Jap.*, 56, n° 4, 1977, p. 415-420.
- [9] T. J. ULRYCH et T. N. BISHOP, *Rev. of Geophys. Space Phys.*, 13, n° 1, 1975, p. 183-200.
- [10] E. A. ROBINSON, *Proc. of I.E.E.E.*, 70, n° 9, 1982, p. 885-907.
- [11] J. SKILLING, *Nature*, 309, 1984, p. 748-749.
- [12] M. MURAKAMI, *Mon. Wea. Rev.*, 107, 1979, p. 994-1013.

N. K. et J.-L. P. : *Centre de Géochimie de la Surface (C.G.S., C.N.R.S.)*,
1, rue Blessig, 67084 Strasbourg Cedex;

D. C. et N. K. : *Laboratoire de Météorologie dynamique (L.M.D., C.N.R.S.)*,
École polytechnique, 91128 Palaiseau Cedex;

Y. T. : *Institut de Recherche scientifique pour le Développement en Coopération (O.R.S.T.O.M.)*,
B. P. n° 2528, Bamako, Mali.

EXPLICATIONS DE LA PLANCHE

Fig. 1. — Déphasage en degrés des ondes de crues calculé par spectres croisés par rapport au Rhône pour une période de 10-15 ans.

Fig. 1. — *Swelling river lags computed by cross-spectra analysis from the Rhône river for a 10-15 year periodicity.*

Fig. 2. — Analyse spectrale par la méthode du Maximum d'Entropie des fleuves Rhône, Danube, et du paramètre SUNS (activité solaire).

Fig. 2. — *Spectral analysis by Maximum Entropy Method for the Rhône, the Danube, and for the parameter SUNS (solar activity).*

Fig. 3. — Variations en opposition de phase des fluctuations du Rhône et du Missouri entre l'Europe et l'Amérique du Nord pour l'ensemble des périodicités inférieures à 12,5 ans.

Fig. 3. — *Phase opposition variations of the fluctuations of the Rhône river and the Missouri river for the periodicities lower than 12.5 years.*

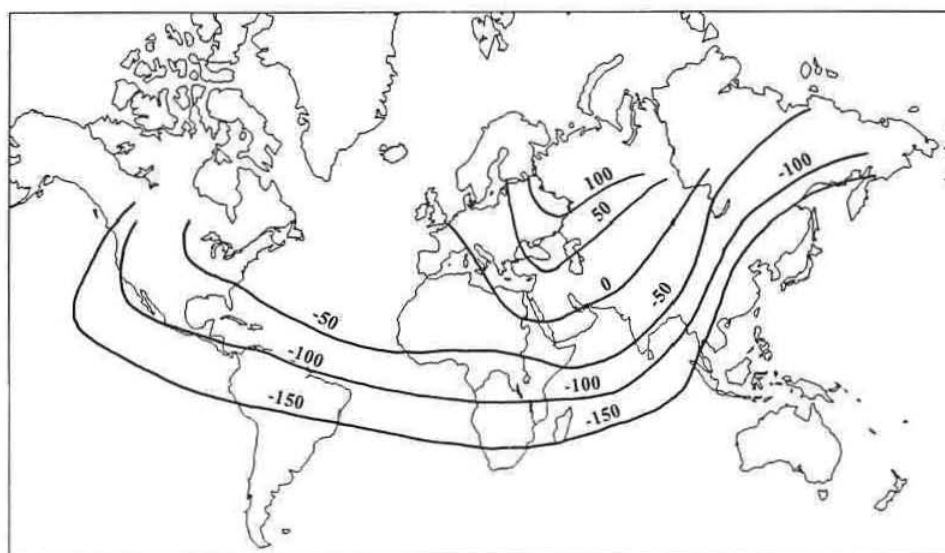


Fig. 1

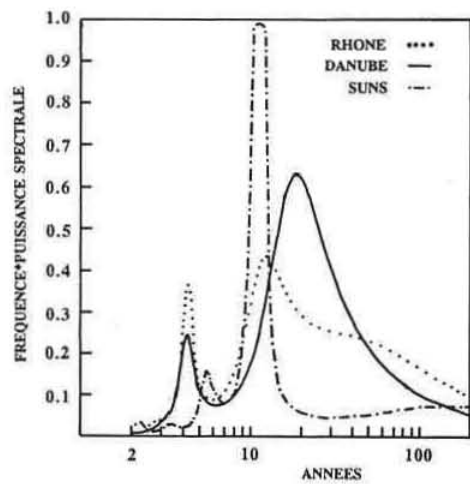


Fig. 2

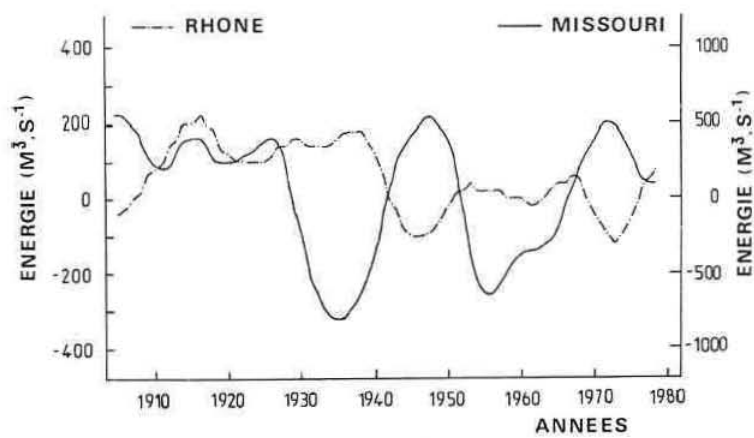


Fig. 3